第46卷 第12期
2023年12月

干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

Vol. 46 No. 12
Dec. 2023

新疆洪水预报预警中融雪径流模型应用进展

余其鹰[1,2]，胡彩虹[1]，白云岗[2]，卢震林[2]，
曹 彪[2]，刘富余[2]，刘成帅[1]

（1. 郑州大学黄河实验室，河南 郑州 450001；2. 新疆水利水电科学研究院，新疆 乌鲁木齐 830049）

摘 要： 针对全球变化背景下极端升温、暴雪和暖湿化现象以及中国新疆地区融雪洪水灾害风险增大问题，概述了新疆不同类型洪水灾害特征，重点阐述了近年发生频率增加、致灾性强、灾害风险增大，但在新疆未引起重视的融雪洪水的研究进展，对比分析了不同类型融雪径流模型特点和研究现状。综合目前融雪径流模型已有进展和面临的挑战，提出新疆未来研究需考虑融雪径流模型的物理机制和融雪消融过程，以提高预报预警精度。回顾了融雪洪水在新疆的预报预警技术，指出构建高精度预报预警融雪洪水模型所面临的风吹雪、冻土表层雪和雪面雨等关键问题，并提出提升新疆洪水模拟、预报预警、应对突发洪水的综合能力的关键技术，为提升新疆融水洪水预报预警技术提供思路与建议。

关 键 词： 融雪洪水；融雪模型；洪水预报；新疆

文章编号： 1000－6060(2023)12－1951－12(1951～1962)

气候变化背景下包括洪水在内的极端天气与气候事件频发已引起国际社会的广泛关注[1]，洪水灾害是全球发生频率最高、损失最严重的自然灾害之一，据不完全统计，平均每年洪水造成的经济损失超过 7×10^{11} USD[2]。在全球变暖背景下，未来全球极端暴雨和洪水事件发生的频次增加，预估全球上百个主要沿海城市2010—2050年累积洪灾损失将超过 1×10^{12} USD[3]。根据近60 a典型洪水数据，可以发现中国洪水呈现出以下新特点和变化：多样性更加突出、人类活动对洪水的影响更加显著、高坝溃决的风险更高以及山洪灾害的频率和影响逐渐增加[4]。为此，2022年，水利部印发关于山洪灾害防御能力提升项目建设工作要求：提升山洪灾害监测能力、提升省级监测预警平台“四预”（预报、预警、预演、预案）功能、提升山洪灾害预警信息共享能力。新疆是中国陆地上面积最大的干旱区，也是气候变化最敏感区域之一，区域常年有大量的冰川、积雪和冻土覆盖，受西风环流、北冰洋高纬气团以及印度洋暖湿气流的交汇作用，温度和湿度变化频繁，旱涝交替，形成了特有的气候特征，研究其独特的山地-绿洲-荒漠洪水特征具有全球意义。

新疆是“丝绸之路经济核心地带”，天山现代冰川有“固体水库”[5]和“中亚水塔”[6]之称。新疆幅员辽阔，影响洪水形成的地表结构、气候条件、土壤渗透能力等自然条件极为复杂，而且洪水的形成与流域自然地理特征和暴雨类型、暴雨路径、降雨特性有关。近年来，受全球变暖影响，新疆降水量高于往年，北疆最大积雪深度呈不断上升趋势[7]，南疆塔克拉玛干沙漠更是发生历史上罕见的大洪水。例如，1998年3月，塔城地区、伊犁哈萨克自治州直属县市和天山北坡发生1949年以来最严重的融雪洪水灾害，直接经济损失超 1×10^{8} 元[8]。2005年3月，伊犁哈萨克自治州直属县市10多万人受灾，牲畜溺死3736头，农田被淹9600 hm^2，直接经济损失超 1×10^{8}

收稿日期： 2023-04-07； **修订日期：** 2023-04-25

基金项目： 新疆维吾尔自治区自然科学基金项目（2022D01A281）；新疆水利科技专项（XSKJ-2023-13）资助

作者简介： 余其鹰（1994-），男，博士研究生，主要从事水文学及水资源方面研究. E-mail: 781832094@qq.com

通讯作者： 白云岗（1974-），男，博士，教授级高级工程师，主要从事农业水土工程等方面研究. E-mail: xjbaiyg@sina.com

元[9]。2021年7月中下旬，位于塔克拉玛干沙漠轮台县中石化油田遭遇洪水袭击，淹没面积达300 km^2，在其油区内，多处河堤溃坝、电线杆倾斜，近50辆勘探车辆、30000套设备被淹。2022年5月29—30日，克孜勒苏柯尔克孜自治州阿合奇县连续2 d降雨量相当于往常5月降雨量的3倍，甚至出现了紫色区域，俨然已成为北方强降雨中心之一。

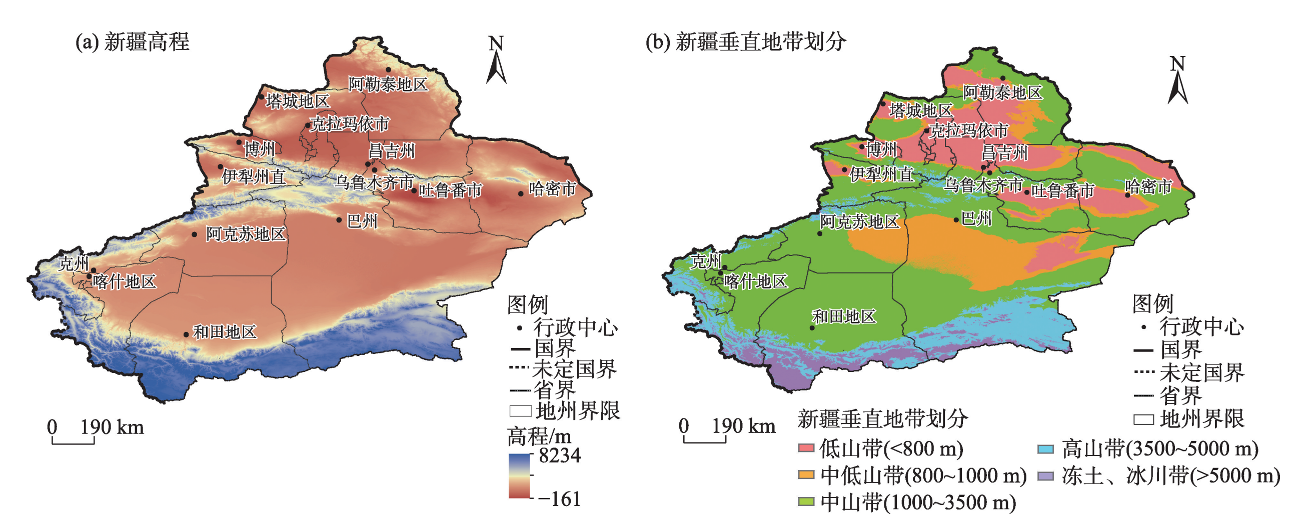
全球变暖背景下，冰川和积雪的融化规律发生了显著变化，南疆地区融雪洪水期提前，发生洪水的频次增加。强降雨过程也加速了积雪的消融过程，容易快速形成地表径流，在地形差别大、积雪较多的山区快速形成雨雪混合灾难性洪水，洪水灾害防控面临新的局面。全面回顾新疆洪水特性、厘清新疆融雪洪水研究进展和构建融雪洪水物理过程技术的进一步发展至关重要。总结分析现阶段新疆洪水类型特点，分析新疆融雪洪水研究现状，对进一步加强新疆洪水监测预警提供支撑能力，对发挥防灾减灾的“第一道防线”起到积极作用。

1 新疆洪水类型及融雪洪水研究进展

1.1 新疆洪水类型

新疆地处高原、山地和盆地交错地带，其典型的三山夹两盆的地理环境格局（图1a），使得洪水成为了新疆最严重的自然灾害之一[10]。洪水形成的垂直地带性可概括为：中低山带主要为暴雨洪水[11]；中山带主要为季节性积雪融水洪水[12]；高山带在冰川发育地区属于雪冰融水洪水和冰川堰塞溃坝型混合洪水，不同类型洪水特征、洪水垂直地带如表1、图1b所示。各垂直地带有独特的洪水成因和类型，大多是几种洪水类型相互交错叠置结果，因此不同地带在不同季节还会出现易发、多发的混合型洪水。

暴雨洪水是新疆形成山洪的主要洪水类型，发生在每年夏季[12]，占全疆洪水灾害总量的73%。统计资料显示[15-16]，近10 a，暴雨洪水灾害呈加重趋势[17-18]，平均每年因暴雨造成的自然灾害占气象灾害的36%，造成当地农牧业生产和人民财产损失越来越大。融雪洪水主要分为季节性融雪洪水和高山冰雪融水，前者主要集中在春季（3—5月），后者主要发生在夏季（6—9月），占新疆洪水类型总量的21%[19]。混合型洪水代表了新疆洪水灾害的独特性，具体而言，混合型洪水又分为多发于5—6月季节性积雪融水和暴雨混合型洪水、7—8月高山雪冰融水与降雪混合型洪水以及夏季高山带雪冰洪水下泄至中、低山带遇暴雨形成的高山雪冰融水与暴雨混合型洪水，变差系数在0.3~0.8之间[20]，具有突发性强、变化快、洪峰流量远超夏季汛期最大流量等特点。为此，学者根据突发洪水事件提出多种预报模型，并且从水文、气温变化对融雪径流进行预测分析，同时还对太阳黑子厚度和周期冷暖进行大尺度预测[21-22]，但混合型洪水时间预测、预报目前仍属于难点。



注：该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号GS(2019)333号的标准底图制作，底图边界无修改。
昌吉州、伊犁州直、博州、巴州和克州分别为昌吉回族自治州、伊犁哈萨克自治州直属县市、博尔塔拉蒙古自治州、巴音郭楞蒙古自治州、克孜勒苏柯尔克孜自治州的简称。

图1 新疆高程和洪水垂直地带划分

Fig. 1 Elevation and flood vertical zone division in Xinjiang

表1 不同类型典型洪水类型致灾情况

Tab. 1 Disaster caused by different typical flood types

洪水类型	发生地区	洪水特征	典型洪水	损失情况
暴雨型洪水	伊犁河谷、塔里木河流域	来势凶猛、突发性强、陡涨陡落、年际变化大、携沙量大、破坏性大	1983年4月、1989年7月、2021年7月	民房倒塌，死亡3人；经济损失9×10^6元；50辆勘探车辆、30000套设备被淹。
融雪型洪水	伊犁河谷、阿尔泰山、天山北坡玛纳斯河、塔里木河流域	变化缓慢、持续时间长、洪量大、洪峰低	2005年3月、2011年5月、2021年5月	11×10^4人受灾，牲畜溺死3736头，农田被淹796 hm²；经济损失超10^8元；房屋倒塌受损，洪水袭击致100余万人受灾；大量牲畜淹死。
混合型洪水	北疆奎屯市、塔城、天山、昆仑山、喀喇昆仑山	洪水迅猛、突发性强、洪水历时长[13]，洪峰呈尖瘦，峰量巨大[14]	1985年3月、1987年7月、2009年3月	死亡3人，冲毁农田57.73 hm²、渠道16 km、民房6154 m²；经济损失3×10^7元；淹没尼勒克县冬小麦超过113.33 hm²。

气候变化导致了全球气温升高和降水分布不均，发生极端降雨的频率增加，强降雨携带泥沙和积雪融水导致洪水破坏力增强[23]，这些因素影响到以冰雪融水为基础的水资源系统的稳定性，也加剧了西北干旱区水资源管理的不确定性。因此，亟需系统研究气候变化对西北干旱区水资源的影响，并深入分析洪水发生的机制，以制定应对未来气候变化的措施，促进区域的可持续发展。

1.2 基于VOSviewer新疆融雪洪水分析

通过整理文献年度发表量能反映该研究在一段时间内的发展水平，基于Web of Science（WOS）的索引，检索策略为“新疆融雪洪水”，共计226篇。由1987—2022年新疆融雪洪水发文量的变化趋势（图2）可知，2000年以前，新疆融雪洪水发文量较少，21世纪开始随着遥感技术和观测手段进步，文献发表量呈上升趋势；在2013年后，对冰雪融水的研究热度显著上升，说明在全球升温背景下，融雪洪水对新疆的破坏力加大。运用可视化VOSviewer软件检索关键词，并对关键词进行聚类分析[24]，得到网络可视化和密度视图结果（图3a~b），圆圈越大说明该关键词出现的次数越多，同一颜色表示为相同聚类，不同颜色表示不同聚类。分析发现，与新疆融雪洪水有关的关键词有气候变化、冰川、降水、山区、径流、模型参数、融化、土地利用、灾害等，说明融雪洪水主要与气候变暖、冰川融化、山区降水和人类活动造成的土地利用方式改变有关，这些因子的变化研究，也是当前融雪洪水的研究热点。WOS纳入分析的275位作者中（图3c~d），密度视图的颜色深浅与合作紧密程度呈正相关，颜色越深代表作者的合作越紧密，其中沈永平（shen yonging）、王顺德（wang shunde）、毛炜峄（mao weiyi）所在的聚类颜色较深，且与李忠勤（li zhongqin）和王国亚（wang guoya）等聚类较为紧密，说明这几个团队合作较多，然而不同团队间缺乏合作，如努尔兰·哈再孜（nurlan hazazi）与其他团队。

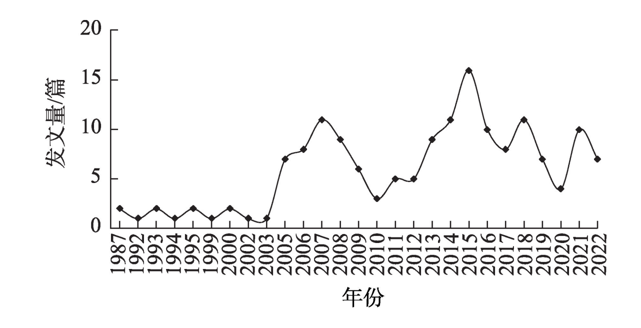


图2 1987—2022年国内融雪洪水发文量

Fig. 2 Number of snowmelt floods issued in China from 1987 to 2022

1.3 融雪洪水阶段性研究

新疆降水稀少，径流主要补给来源为冰雪融水，而冰雪对气候变化响应迅速，导致融雪洪水预报预警、时空分布、洪水演进的不确定性加大，为此学者对新疆融雪洪水进行研究。国内外学者对新疆融雪洪水研究起步较晚，1987年，谷爱莲[25]首次提出春洪预报模型与秋冬季降水、入冬期的早晚、最大冻土深度有关。考虑积雪、温度和降水等因子，可为洪水预测预报提供依据[26]。20世纪90年代学者仅对洪水特征、洪水形成气候因素、洪水预测等做了分析[27-29]，一方面国内外对融雪洪水研究较少，另一方面新疆融雪洪水还未引起足够的重视。

21世纪初，学者对新疆典型融雪洪水形成过程进行了研究，以便寻求融雪洪水的一般规律[30]，如以天山为代表，采用数理统计等方法，分析天山北麓洪水形成机理，在此基础上，采用频率分析和相

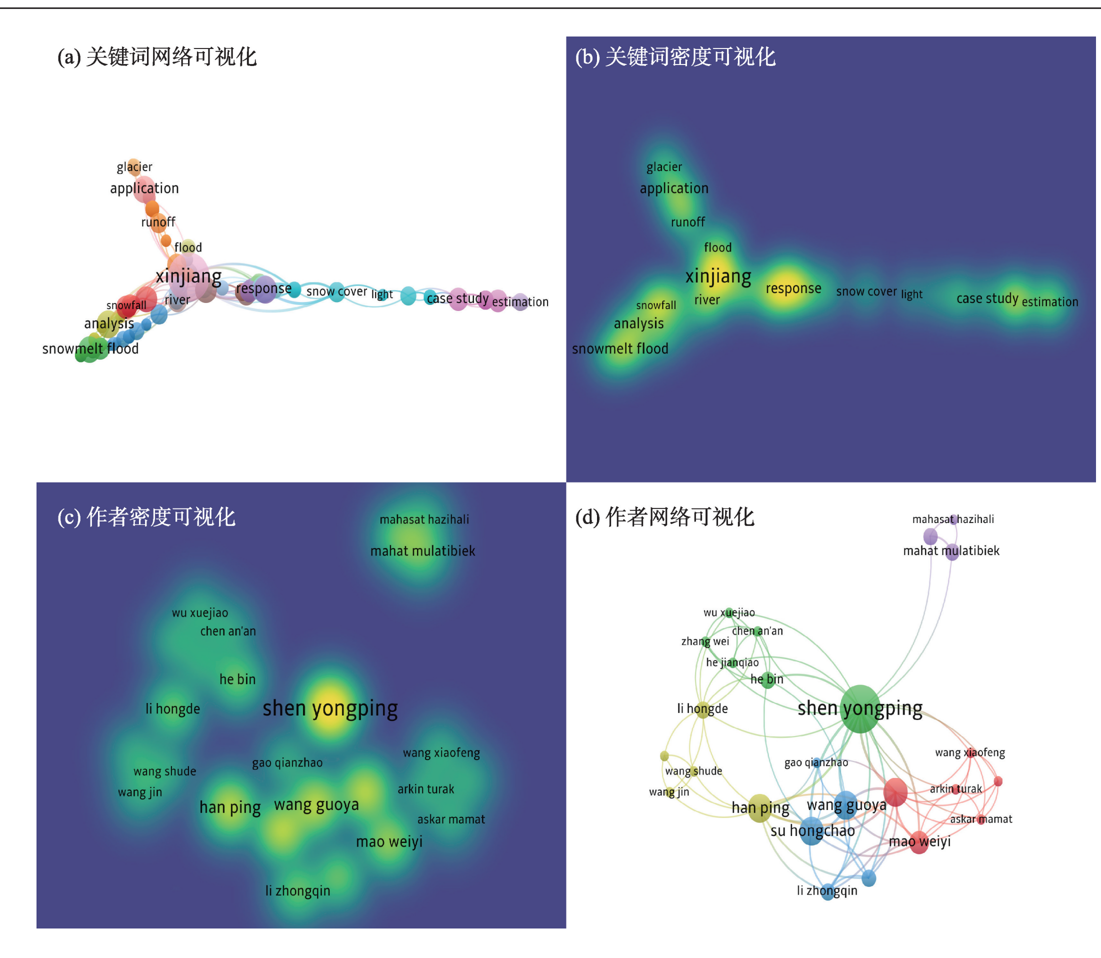


图3 WOS中新疆融雪洪水关键词聚类视图及作者密度视图

Fig. 3 Keyword cluster view and author density view of snowmelt flood of Xinjiang in WOS

关分析等统计方法,建立融雪洪水预报模型[31]。随着分布式计算机技术,面向对象的构建技术兴起,WebGIS成为发展的重要方向。董开发[32]从融雪洪水信息系统特点出发,提出了系统的总体设计,结合系统功能,提出了本系统数。基于Web服务的架构,成功应用于卡海水库的防洪预报调度,实现了研究的预期目标[33]。洪水预报预警能够直接帮助政府和公众更好地应对洪水灾害,早期预报采用日平均流量的偏最小二乘回归模型[34],存在预报精度低、时效短、不可靠等缺点。为此,刘永强等[35]提出以数据仓库、方法库、模型库以及知识库一体化模式,实现基于“3S”的新疆融雪洪水预警决策支持系统。建立新疆融雪洪水预警DSS技术,驱动分布式新疆融雪径流模型[36],为决策者提供准确的预警信息[37]。此外,将神经网络理论应用于冰雪融水补给为主的河流来水过程模拟与预报,也为无调蓄设施灌区灌溉来水预报提供一种新的方法和途径[38]。随着遥感技术的发展,MODIS数据和地理信息系统(GIS)结合可以准确描述积雪制图和积雪消耗曲线,也可为模拟融雪径流提供参考[39]。如基于积雪层能量平衡原理建立融雪模型,结合气象数据和采用遥感数据对雪盖进行实时监测,避免在进行融雪量估算时候对无雪区的错误估算[40]。利用遥感(RS)、GIS技术和MODIS影像数据等数据源[41]、结合“3S”技术和数字高程模型(DEM)技术,实现模型的分布式特性并具有严格的物理机制[42]。截止2013年,随着“3S”技术发展,学者采用了基于Web洪水管理系统、遥感和GIS融合的分布式融雪模型,同时还首次使用了SRM(Snow runoff model)模型,对研究融雪洪水成因、致灾机理有了新的突破。

缺乏系统观测数据也给融雪洪水高精度模拟带来了巨大挑战,现阶段中国西北地区气象站分布较少[43],新疆更为稀疏。以中国地面降水格点数据、气象站观测数据和不同卫星降水产品,驱动融雪径流模型模拟融雪洪水径流与实测径流对比[44-45],可以提高模型中融雪速率和径流系数的精度,为提

高具有融雪洪水特征无资料地区融雪洪水预报提供了支撑。随着遥感技术的发展，学者采用高分辨率积雪遥感数据，如GF-1PMS（Panchromatic and multi-spectral）和WFV（Wide field of view）、HJ-1CCD（Charge-coupled device）和IRS（Infrared scanner）等国产高分光学遥感数据和C波段RADARSAT-2、ENVISATASAR等合成孔径雷达数据[46]，探索复杂山区地形的综合矫正方法，分析流域积雪变化过程，对融雪径流进行参数率定和校正、模型预报提供科学依据。2014至今，学者发现传统的气象数据无法更加深刻表征洪水的融雪过程，引入了卫星产品、雷达产品以及多源数据融合的气象数据研究融雪洪水的演化过程。此外，还使用了国内外具有物理意义的分布式融雪模型，学者从多方面研究新疆融雪洪水对防洪减灾具有科学指导意义。

尽管学者一直致力于研发融雪洪水预报预警模型和系统，但受高山区融雪监测能力限制，升温背景下对融雪洪水认识不足，水文气象数据匮乏，以及融雪洪水复杂的水热耦合过程，限制融雪洪水预报预警模型和系统发展与推广，下文对融雪径流模型及融雪洪水预报预警技术进行综述。

2　融雪径流模型

融雪径流模型是评估融雪径流变化、提升水资源管理效率的重要手段。根据融雪径流模型的消融算法，可以将融雪径流模型分为统计型、概念型、物理型和数据驱动型。

2.1　统计型融雪模型

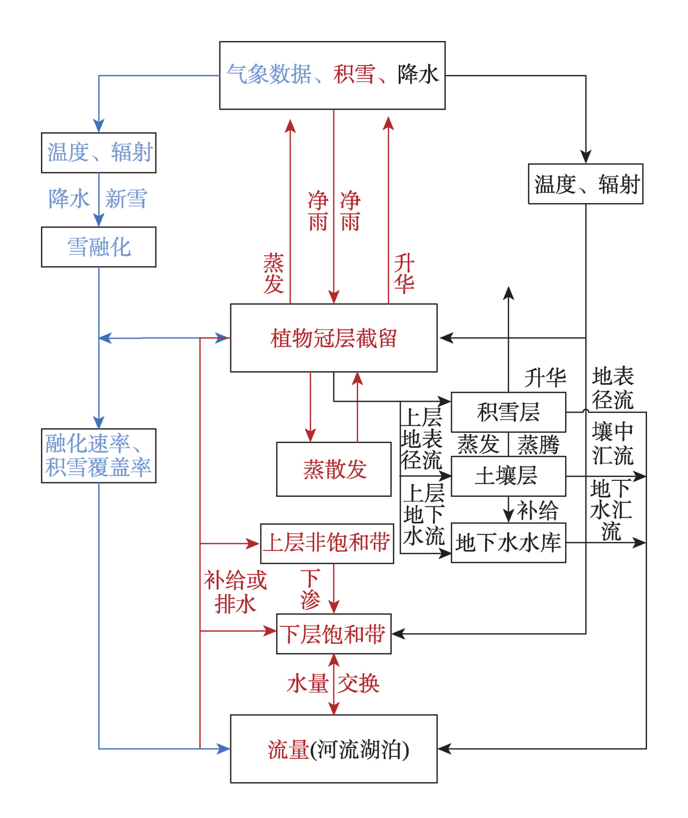
统计型融雪径流模型使用统计方法或者黑箱模型建立有特定水文特征参数与径流之间的关系，主要用于预测径流，如Leisenring等[47]使用美国国家气象局Snow-17模型预测加州太浩湖附近一个小流域的季节性雪水当量。然而该模型主要针对典型流域并且需要足够的观测结果，模型才会有较高的模拟精度，因此很难推广到其他流域，此外，融雪径流产生机制尚不清楚。

2.2　概念型融雪模型

概念模型主要建立融雪与温度之间的经验关系，通常是基于度日因子概念建立的。1887年，为研究冰川变化首次提出了度日因子概念[48]，随后学者对其进行多次改进，如今广泛用于北欧[49]、阿尔卑斯山[50]、青藏高原[51]和新疆天山[52]的冰雪融化研究。如HBV（Hydrologiska byråns vattenbalansavdelning）模型、PRMS（Precipitation-runoff models）模型和SRM模型等，3种模型结构见图4。HBV模型是一种半分布式水文模型，它是专门针对北欧寒区流域的特点而开发的[53]，可在若干单元面积上分开运行，最后将单元面积的汇集量相加。PRMS模型是由美国地质局开发的可用于评估降水、气温、土地利用变化过程的物理过程的系统，经过改进，可嵌入冰川径流模块进行模拟。近年来，国际气象组织推荐的SRM模型在国内外有颇为丰硕的成果，国内学者研究表明，SRM模型在西北典型干旱区河流流域具有良好的应用前景，特别对春季融雪洪水预测取得了良好的效果，然而它无法模拟融雪的物理过程[54]。基于度日因子的概念型融雪径流模型假设整个流域融雪消融均匀发生，在模拟空间分布存在很大的不确定性，此外，度日因子很难捕获融雪率的日内变化，因此，急需开发改进的空间分布模型和充分考虑时空差异概念模型。

2.3　物理型融雪模型

物理模型是基于积雪的能量平衡来计算融雪



注：蓝色字体为SRM模型；红色字体为HBV模型；黑色字体为PRMS模型。

图4　SRM、HBV、PRMS模型结构

Fig. 4　Structures of SRM, HBV and PRMS models

量，具有严格的物理意义。当今广泛使用的物理分布式融雪径流模型具有较高的时间和空间分辨率，在计算复杂地形和植被覆盖中具有很大的优势。20世纪50年代，美国首次提出使用积雪和环境之间的能量交换计算融雪径流，Richard等[55]将能量平衡方程应用到积雪消融过程中，随后提出了具有完整点尺度的雪能量和质量平衡方程。70年代起，由于计算机技术发展推动分布式物理模型的发展，学者开发了第一个具有代表性的物理水文模型——欧洲水文模型SHE（System hydrological European）[56]，该模型将流域划分为多个小空间单元，并分别计算每个网格内的水文过程和水文响应。20世纪90年代，学者还开发了一些分布式融雪模型，并且模型中还有加入了融雪模块，如DHSVM（Distributed hydrology soil vegetation model）、VIC（Variable infiltration capacity）、SWAT（Soil and water assessment tool）[57]等模型，此类模型都考虑了积雪融化的空间垂直分布。其中SWAT模型是一个具有较强物理机制可用于长序列模拟的流域水文模型，模型同时提供多种方法对流域实现离散化，分别进行水文单元的产流计算，计算流域出口处流量过程。基于能量平衡模型，学者已经开发了两层或多层融雪径流模型，如SNTHERM（Snow thermal model）模型[58]和Snowpack模型[59]，它们可以预测积雪的沉降、分层、地表能量交换和质量平衡，而且还可预测雪崩的发生。物理分布式模型具有严格的物理意义，但物理分布式模型很难确定部分空间参数，随着大数据和高性能计算机发展，许多参数可以通过遥感技术获取，分布式融雪径流模型发展也成为融雪径流模型径流预测研究的关键方法。

2.4 数据驱动型融雪模型

数据驱动模型是当今海量数据和计算机能力快速增长的产物，其主要侧重于提高预测的准确性，通常使用机器学习的方法处理具有更高维度和更多变量的复杂问题。Vafakhah等[60]使用人工神经网络模型（ANN）和自适应神经模糊推理系统（ANFIS）模拟了伊朗塔里干厄尔布尔士的融雪径流；Thapa[61]开发了一个基于深度学习长短时间记忆（LSTM）网络模型，用于模拟喜马拉雅盆地融雪驱动流量模型，该模型使用遥感积雪产品为输入，并和支持向量回归（SVR）模型进行了比较。此外，机器学习还可应用于计算缺失的观测数据[62]，生产高精度降雨观测数据，通过卫星估计积雪量[63]。但作为一种黑箱模型，数据驱动对建模过程描述不足，也很难对不同模型进行有意义的比较，这导致数据驱动模型的应用无法大面积推广，所以数据驱动应当成为物理模型的合作者，而不是竞争者，应将两者结合，通过数据驱动的方法确定物理模型的参数，两者互补。

以上模型都停留在数据本身的相关性上，缺乏对融雪洪水的实际物理过程表征（降雪-冰川-冻土-壤中流），相关研究表明，在全球变化背景下，北半球春季、降雨季节将会提前[64]，更容易发生融雪洪水事件，而且向新疆海拔高、坡度陡、积雪量大和更容易形成洪水地区发展。因此，仍然需要明晰融雪洪水过程物理机制和消融过程，提高预报预警精度。

3 融雪洪水预报预警技术

在防洪减灾工作中，洪水预报预警是洪水防御工作中的耳目和参谋，可以帮助用水管理部门和公众更好地应对洪水灾害的影响。自从2002年中欧发生特大洪水以来，欧洲联合研究中心和气象部门在提高防洪能力和应对洪水事件方面取得了显著成效[65]，2003年开展了“欧洲洪水预警系统”研究项目，同时借助气象部门51种概率天气预报，根据目前的系统已经可以提前预报未来3~10 d的洪水[66]；美国是全球防御洪涝灾害技术手段较为先进的国家之一，最新的成果包括国家水模型系统和山洪预警指南系统，这些系统于2016年投入运行，国家水模型系统可以提供未来最长30 d的水文预报，其空间分辨率高达1 km；俄罗斯水文和环境监测部门通过多新闻媒体、政府部门共同构建了洪水预报预警系统[67]；韩国基于智能化软件，建立了洪水预警系统等[68]。

新疆地区融雪洪水预报预警系统研发方面，2000年，学者提出运用GIS技术[69]，构建多功能为一体的流域供水管理决策支持系统解决融雪洪水预报预警问题。随后，又对系统进行优化，提高决策者的决策效率，以期降低洪水灾害的损失[70]。2009年，闫彦等[71]结合北疆地区春季融雪洪水的特点，引入自然、经济、人口、防洪设施贡献四大类因子，结合当地的经济和社会现状，进行量化处理后，构建出度量融雪洪水灾害大小的预警指数模型。该

预警模型的建立对于有效减少春季洪水的损失,保护当地人民的生命和财产安全具有重要意义。基于“3S”技术以及高分辨率DEM数据,考虑融雪洪水量级及时空分布和融雪可能造成的损失,以此作为春季融雪洪水预警依据,提前进行融雪洪灾预警[37]。Fang等[72]和Liu等[73]采用实测数据,基于改进的新疆融雪型洪水预报算法构建了天山北坡呼图壁县军塘湖流域的积雪洪水灾害框架。王大环等[74]运用熵权确定影响因素的权重,并利用模糊C均值聚类模式识别分类方法,通过对其产流类型进行分类来迅速区分不同的洪水类型,从而提高洪水预报的精度。陈伏龙等[75]等用“分解-合成”、贝叶斯理论对序列一致性修正前后的参数不确定性进行分析,从而提高融雪洪水预报期间的可靠性。

综上,新疆地区融雪洪水预报预警技术的研究和应用技术包括“3S”技术、自然、经济、人口、防洪设施贡献四大类因子的量化处理、积雪洪水灾害框架、熵权确定影响因素的权重等。通过这些技术的研发和应用,可以更加准确地预测和预警新疆地区的融雪洪水,提高对洪水的防范和应对能力,保护当地人民的生命和财产安全。

4　问题与展望

4.1　模型问题及展望

通过对比不同融雪模型的精准度发现,融雪模型中还需要注意风吹雪、冻土表层雪和雪面雨3个关键问题。风吹雪能造成融雪过程在时空分布上的差异,雪的升华和迁移,在中国西部地区,风吹雪导致24%的雪量升华[76],这将降低融雪模型的准确性。一些学者已经开发了一些风吹雪模型,如使用气象和土地利用数据估计雪颗粒的旋转、悬浮和升华速度PBSM(Prairie blowing snow model)模型[77]、三维扩展模拟所需风场、表层浮雪扩散方程和旋转输运方程描述雪漂移过程等[78]。目前,大多数融雪模型都没有考虑风吹雪的因素,因此将风吹雪模型与融雪径流模型耦合是进一步研究的科学问题。

在土壤冻结和融化过程中,温度和土壤水分是2个重要因素,两者的共同变化表征着冻土中的水热变化,从而影响地表附近的水热平衡[79]。冻土的埋深决定了径流对降水的响应速度,在冻土和积雪之间水热耦合已经有了一些成功的模型,如使用VIC模型分析了密西西比河流域的融雪过程,发现融雪径流随着永久冻土的覆盖增加[80]。永久冻土对土壤的导热性有很大影响,对于不同时间尺度、不同土壤性质的融雪径流影响仍然是一个难题,因此有必要在融雪模型中添加冻土模块以提高模型的准确度。

雪面雨洪水是世界上普遍存在的现象,其主要是在积雪消融季节中有低山区降雨和高山区积雪混合形成一种特殊的比融雪洪水更强烈的混合洪水[81]。相关研究表明,北半球春季降水提前,雪面雨事件增多,且向高海拔、积雪多、坡度陡、易于形成洪水的地区发展。在美国西部内陆山脉、阿巴拉契亚山脉地区超过70%以上的极端洪水是由雪面雨造成的,英国也出现了雪面雨洪水,甚至雪面雨还会加剧北极地区积雪消融过程。如何界定雪面雨事件、雪面雨侵蚀积雪动力过程及其诱发的洪水机制、雪面雨事件的水文预报和雪面雨引起的混合径流产生机制仍不清楚,需进一步研究,未来利用多源遥感、同位素等数据可能是提高雨雪冰混合洪水模拟精度的重要手段。

4.2　技术问题及展望

(1) 河道洪水演进过程及技术开发

在全球变暖背景下,新疆融雪洪水增多并将引发更多的极端洪水。在新疆南疆地区河道含沙量大,河道演进较快,是沙漠洪水的触发器,但相关研究极为匮乏。通过研究河道内滩区河道演进,揭示洪水对河沙运移机制,既是该领域研究的热点,也是当前南疆荒漠地区“绿色走廊”维护的重要需求。

(2) 气候变化及人类活动对积雪融化产生影响

在全球变暖背景下,融雪洪水灾害风险上升,积雪融化期提前,并且改变了冰川和冻土的产汇流过程。在未来气候变化背景下,人类活动引起的下垫面变化、炭黑、气溶胶、侵蚀融雪将最终改变融雪消融过程,增加了融雪洪水相态的不确定性,因此亟需开展相应的影响机制和物理模型。

(3) 混合型洪水灾害模拟技术

极端降水、积雪融水和冰川融水混合洪水携带泥沙和石块导致洪水破坏力叠加增强,研究此类洪水是当前国际难点问题,为提高融雪洪水模拟精度,亟需定量描述该类型洪水触发条件,形成机制和致灾过程。

随着当前微波、遥感技术和自动化监测技术的不断发展,洪水监测和预报预警技术得到显著提

升,但在新疆洪水灾害依然是最大的自然灾害防御短板。此外,受气候影响,对新疆混合型突发洪水演进过程认识不足,融雪洪水预报预警精度低于气象部门预警精度。因此,亟需开展新疆典型流域复杂系统洪水演进与水利工程群的协同关系研究,洪水演化过程中的不确定性及数据同化技术研究,全面提升新疆地区洪水监测、模拟、预测、预警、应对突发洪水的综合能力,助力"一带一路"建设。

参考文献(References)

[1] 方建, 杜鹃, 徐伟, 等. 气候变化对洪水灾害影响研究进展[J]. 地球科学进展, 2014, 29(9): 1085-1093. [Fang Jian, Du Juan, Xu Wei, et al. Advances in the study of climate change impacts on flood disaster[J]. Advances in Earth Science, 2014, 29(9): 1085-1093.]

[2] Chen A F, Giese M, Chen D L. Flood impact on mainland Southeast Asia between 1985 and 2018: The role of tropical cyclones[J]. Journal of Flood Risk Management, 2020, 13(2): e12598, doi: 10.1111/jfr3.12598.

[3] Hallegatte S, Green C, Nicholls R J, et al. Future flood losses in major coastal cities[J]. Nature Climate Change, 2013, 3(9): 802-806.

[4] 万新宇, 王光谦. 近60年中国典型洪水灾害与防洪减灾对策[J]. 人民黄河, 2011, 33(8): 1-4. [Wan Xinyu, Wang Guangqian. Typical flood disasters during last sixty years and strategies of flood control and disaster mitigation in China[J]. Yellow River, 2011, 33(8): 1-4.]

[5] 周莉荔. 塔里木河流域水资源市场配置研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2010. [Zhou Lili. Study on water resource market allocation in Tarim River Basin[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2010.]

[6] 陈亚宁, 李稚, 方功焕. 中亚天山地区关键水文要素变化与水循环研究进展[J]. 干旱区地理, 2022, 45(1): 1-8. [Chen Yaning, Li Zhi, Fang Gonghuan. Changes of key hydrological elements and research progress of water cycle in the Tianshan Mountains, Central Asia[J]. Arid Land Geography, 2022, 45(1): 1-8.]

[7] 赵琴, 郝晓华, 和栋材, 等. 1980—2019年北疆积雪时空变化与气候和植被的关系[J]. 遥感技术与应用, 2021, 36(6): 1247-1258. [Zhao Qin, Hao Xiaohua, He Dongcai, et al. The relationship between the temporal and spatial changes of snow cover and climate and vegetation in northern Xinjiang from 1980 to 2019[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2021, 36(6): 1247-1258.]

[8] 吴素芬, 刘志辉, 邱建华, 等. 北疆地区融雪洪水及其前期气候积雪特征分析[J]. 水文, 2006, 26(6): 90-93. [Wu Sufen, Liu Zhihui, Qiu Jianhua, et al. Analysis of snowmelt flood and its pre-climatic snow cover characteristics in northern Xinjiang[J]. Journal of China Hydrology, 2006, 26(6): 90-93.]

[9] 周刚, 崔曼仪, 李哲, 等. 新疆春季融雪洪水危险性动态评价研究[J]. 干旱区研究, 2021, 38(4): 950-960. [Zhou Gang, Cui Manyi, Li Zhe, et al. Dynamic evaluation of the risk of the spring snowmelt flood in Xinjiang[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(4): 950-960.]

[10] 徐羹慧, 陆帼英. 21世纪前期新疆洪旱灾害防灾减灾对策研究[J]. 沙漠与绿洲气象, 2007, 1(5): 54-58. [Xu Genghui, Lu Guoying. Research on disaster prevention and mitigation countermeasures for flood and drought disasters in Xinjiang in the early 21st century[J]. Desert and Oasis Meteorology, 2007, 1(5): 54-58.]

[11] 李燕. 近40 a来新疆河流洪水变化[J]. 冰川冻土, 2003, 25(3): 342-346. [Li Yan. Change of river flood and disaster in Xinjiang during past 40 years[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2003, 25(3): 342-346.]

[12] 杨金明, 李诚志, 房世峰, 等. 新疆地区季节性融雪洪水模拟与预报研究[J]. 新疆大学学报(自然科学版), 2019, 36(1): 80-88. [Yang Jinming, Li Chengzhi, Fang Shifeng, et al. A review of seasonal snow-melt flood simulation and forecast in Xinjiang[J]. Journal of Xinjiang University (Natural Science Edition), 2019, 36(1): 80-88.]

[13] 麻军. 2000年与1999年新疆特大混合型洪水的气象成因对比分析[J]. 新疆气象, 2004(6): 7-9. [Ma Jun. The Comparison and analysis of the meteorological factors contributed to two catastropic mixed floods in Xinjiang[J]. Xinjiang Meteorology, 2004(6): 7-9.]

[14] 张智超. 新疆头屯河流域洪水特性分析[J]. 水利科技与经济, 2015, 21(2): 92-94. [Zhang Zhichao. Study on flood characteristics of Toutun River Basin of Xinjiang[J]. Water Conservancy Science Technology and Economy, 2015, 21(2): 92-94.]

[15] 殷剑虹, 王翔. 伊犁河谷春夏季极端天气气候的变化分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2009, 3(6): 26-28. [Yin Jianhong, Wang Xiang. Extreme weather and climate over Yili Valley in spring and summer[J]. Desert and Oasis Meteorology, 2009, 3(6): 26-28.]

[16] 谢泽明, 周玉淑, 杨莲梅. 新疆降水研究进展综述[J]. 暴雨灾害, 2018, 37(3): 204-211. [Xie Zeming, Zhou Yushu, Yang Lianmei. Review of study on precipitation in Xinjiang[J]. Torrential Rain and Disasters, 2018, 37(3): 204-211.]

[17] 毛炜峄, 樊静, 沈永平, 等. 近50 a来新疆区域与天山典型流域极端洪水变化特征及其对气候变化的响应[J]. 冰川冻土, 2012, 34(5): 1037-1046. [Mao Weiyi, Fan Jing, Shen Yongping, et al. Variations of extreme flood of the rivers in Xinjiang region and some typical watersheds from Tianshan Mountains and their response to climate change in recent 50 years[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2012, 34(5): 1037-1046.]

[18] 赵勇, 邓学良, 李秦, 等. 天山地区夏季极端降水特征及气候变化[J]. 冰川冻土, 2010, 32(5): 927-934. [Zhao Yong, Deng Xueliang, Li Qin, et al. Characteristics of the extreme precipitation events in the Tianshan Mountains in relation to climate change[J].

Journal of Glaciology and Geocryology, 2010, 32(5): 927-934.]

[19] 温克刚. 中国气象灾害大典(新疆卷)[M]. 北京: 气象出版社, 2006: 26-100. [Wen Kegang. China meteorological disasters (Xinjiang Volume)[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2006: 26-100.]

[20] 马永红. 浅谈新疆主要河流洪水类型及变差系数 C_v 特征[J]. 地下水, 2018, 40(2): 171-173. [Ma Yonghong. Discussion on the flood types and characteristics of C_v of major rivers in Xinjiang[J]. Ground Water, 2018, 40(2): 171-173.]

[21] 陈亚宁, 王志超. 四棵树河突发性洪水预测预报初探[J]. 干旱区研究, 1999, 22(4): 14-21. [Chen Yaning, Wang Zhichao. A preliminary study on the prediction and forecasting of sudden floods in the Four Trees River[J]. Arid Zone Research, 1999, 22(4): 14-21.]

[22] 王润, 高前兆. 塔里木河流域突发性洪水初步研究[J]. 地理科学, 1996, 16(2): 144-149. [Wang Run, Gao Qianzhao. A preliminary study on the sudden flood in Tarim River Basin[J]. Scientia Geographica Sinica, 1996, 16(2): 144-149.]

[23] 陈亚宁, 杨思全, 李卫红. 天山麦兹巴赫冰川湖突发性洪水分形特征研究[J]. 冰川冻土, 1999, 21(3): 253-256. [Chen Yaning, Yang Siquan, Li Weihong. Study on water pattern characteristics of sudden flood in Mezbach Glacier Lake, Tianshan Mountains[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1999, 21(3): 253-256.]

[24] 串丽敏, 郑怀国, 赵同科, 等. 基于Web of Science数据库的土壤污染修复领域发展态势分析[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(1): 12-20. [Chuan Limin, Zheng Huaiguo, Zhao Tongke, et al. Trends in research on contaminated soil remediation based on Web of Science database[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2016, 35(1): 12-20.]

[25] 谷爱莲. 石河子春季融雪型洪水的气候因素及其预报[J]. 新疆气象, 1987(8): 18-21. [Gu Ailian. Climatic factors and forecast of snowmelt flood in Shihezi in spring[J]. Xinjiang Meteorology, 1987(8): 18-21.]

[26] 梁春成, 杨乃康, 陈亚宁. 天山宁家河春季融雪洪水成因初探[J]. 干旱区地理, 1993, 16(3): 75-79. [Liang Chuncheng, Yang Naikang, Chen Yaning. A preliminary study on snow melt flood of Ningjia River, Tianshan Mountains[J]. Arid Land Geography, 1993, 16(3): 75-79.]

[27] 俞永旺, 徐冰, 白东明, 等. 天山北坡雀尔沟河春季融雪洪水的成因分析[J]. 干旱区研究, 1995, 18(3): 15-20. [Yu Yongwang, Xu Bing, Bai Dongming, et al. Analysis on the causes of spring melted flood in Quergou River[J]. Arid Zone Research, 1995, 18(3): 15-20.]

[28] 仇家琪, 徐俊荣, 陈亚宁, 等. 天山北坡春季雪洪形成的气候因子分析[J]. 干旱区地理, 1995, 18(1): 43-50. [Qiu Jiaqi, Xu Junrong, Chen Yaning, et al. Preliminary evaluation on climatic factors related to spring snowmelt floods[J]. Arid Land Geography, 1995, 18(1): 43-50.]

[29] Aizen V B, Aizen E M, Melack J M. Precipitation, melt and runoff in the northern Tien Shan[J]. Journal of Hydrology, 1996, 186(1-4): 229-251.

[30] 隗经斌. 新疆军塘湖河典型融雪洪水过程研究[J]. 冰川冻土, 2006, 28(4): 530-534. [Wei Jingbin. Snowmelt floods of the Juntanghu River in Xinjiang region[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2006, 28(4): 530-534.]

[31] 王志杰, 迪里木拉提, 李丛林. 天山北麓低山丘陵地区春季融雪洪水的研究——以三工河古河道为例[J]. 干旱区地理, 2002, 25(4): 302-308. [Wang Zhijie, Dilimulat, Li Conglin. Study on the spring floods caused by snow melt water in low-mountain and hill regions of northern piedmont of the Tianshan Mountains: A case study in the paleochannels of Sangong River[J]. Arid Land Geography, 2002, 25(4): 302-308.]

[32] 董开发. 基于WebGIS的融雪洪水信息发布管理系统[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2005. [Dong Kaifa. Snowmelt flood information release management system based on WebGIS[D]. Urumqi: Xinjiang University, 2005.]

[33] 李根. 基于Web的融雪地区水库预报调度研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2006. [Li Gen. Web-based reservoir forecasting regulation system research in snowmelt area[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2006.]

[34] 覃新闻, 李智录, 李波. 基于偏最小二乘回归的融雪型洪水预报模型[J]. 水文, 2006, 26(5): 38-40. [Qin Xinwen, Li Zhilu, Li Bo. Snow melting flood forecast model based on partial least-squares regression[J]. Journal of China Hydrology, 2006, 26(5): 38-40.]

[35] 刘永强, 刘志辉. 新疆融雪洪水预警决策支持系统研究[J]. 干旱区资源与环境, 2007, 21(2): 110-113. [Liu Yongqiang, Liu Zhihui. Development about decision support system for snowmelt flood prediction of Xinjiang[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2007, 21(2): 110-113.]

[36] 刘永强. 新疆融雪洪水预警DSS关键技术及实现方式研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2007. [Liu Yongqiang. Research on key technologies and implementation methods of DSS for snowmelt flood warning in Xinjiang[D]. Urumqi: Xinjiang University, 2007.]

[37] 刘志辉. 基于“3S”技术的新疆融雪洪水预测预警及决策支持研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2009. [Liu Zhihui. The prediction, early-warning for snowmelt flood and decision support based on “3S” technology in Xinjiang[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2009.]

[38] 李智录, 高杰, 沈冰, 等. 基于神经网络的灌区融雪型河源来水预报模型[J]. 农业工程学报, 2006, 22(4): 66-69. [Li Zhilu, Gao Jie, Shen Bing, et al. Neural network model for predicting snow melting headwater inflow in irrigation areas[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2006, 22(4): 66-69.]

[39] Xue H Z, Wang J D, Xiao Z Q, et al. Combining MODIS and AMSR-E observations to improve MCD43A3 short-time snow-covered Albedo estimation[J]. Hydrological Processes, 2014, 28(3): 570-580.

[40] 赵求东, 刘志辉, 房世峰, 等. 基于EOS/MODIS遥感数据改进式

融雪模型[J]. 干旱区地理, 2007, 30(6): 915-920. [Zhao Qiudong, Liu Zhihui, Fang Shifeng, et al. Improved snowmelt model based on EOS/MODIS remote sensing data[J]. Arid Land Geography, 2007, 30(6): 915-920.]

[41] 裴欢, 房世峰, 刘志辉, 等. 分布式融雪径流模型的设计及应用[J]. 资源科学, 2008, 30(3): 454-459. [Pei Huan, Fang Shifeng, Liu Zhihui, et al. Design and application of distributed snowmelt-runoff[J]. Resources Science, 2008, 30(3): 454-459.]

[42] 乔鹏, 秦艳, 刘志辉. 基于能量平衡的分布式融雪径流模型[J]. 水文, 2011, 31(3): 22-26. [Qiao Peng, Qin Yan, Liu Zhihui. A spatially distributed snowmelt model based on energy balance[J]. Journal of China Hydrology, 2011, 31(3): 22-26.]

[43] 房世峰, 裴欢, 刘志辉, 等. 遥感和GIS支持下的分布式融雪径流过程模拟研究[J]. 遥感学报, 2008, 12(4): 655-662. [Fang Shifeng, Pei Huan, Liu Zhihui, et al. Study on the distributed snowmelt runoff process based on RS and GIS[J]. National Remote Sensing Bulletin, 2008, 12(4): 655-662.]

[44] 孙铭悦, 吕海深, 朱永华, 等. 2套气象数据在资料缺乏地区的适用性评估——以呼图壁河流域为例[J]. 干旱区研究, 2022, 39(1): 94-103. [Sun Mingyue, Lü Haishen, Zhu Yonghua, et al. Applicability assessment of two meteorological datasets in areas lacking data with the Hutubi River Basin as an example[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(1): 94-103.]

[45] 李兰海, 尚明, 张敏生, 等. APHRODITE降水数据驱动的融雪径流模拟[J]. 水科学进展, 2014, 25(1): 53-59. [Li Lanhai, Shang Ming, Zhang Minsheng, et al. Snowmelt runoff simulation driven by APHRODITE precipitation dataset[J]. Advances in Water Science, 2014, 25(1): 53-59.]

[46] 王靖文, 唐志光, 邓刚, 等. 1991—2021年天山融雪末期雪线高度遥感监测研究[J]. 干旱区研究, 2022, 39(5): 1385-1397. [Wang Jingwen, Tang Zhigugang, Deng Gang, et al. Monitoring of snowline altitude at the end of melting season in Tianshan Mountains from 1991 to 2021[J] Arid Zone Research, 2022, 39(5): 1385-1397.]

[47] Leisenring M, Moradkhani H. Snow water equivalent prediction using Bayesian data assimilation methods[J]. Stochastic Enviormental Research and Risk Assessment, 2011, 25(2): 253-270.

[48] Ring D R, Calcote V R, Cooper J N, et al. Generalization and application of a degree-day model predicting pecan nut casebearer (Lepidoptera: Pyralidae) activity[J]. Environmental Entomology, 1983, 76(4): 831-835.

[49] Oerlemans J, Anderson B, Hubbard A, et al. Modelling the response of glaciers to climate warming[J]. Climate Dynamics, 1998, 14(4): 267-274.

[50] Fischer A. Glaciers and climate change: Interpretation of 50 years of direct mass balance of Hintereisferner[J]. Global and Planetary Change, 2010, 71(2): 13-26.

[51] 陈飞, 蔡强国, 孙莉英. 青藏高原纳木错流域冰雪融水径流量估算[J]. 中国水土保持科学, 2016, 14(2): 127-136. [Chen Fei, Cai Qiangguo, Sun Liying. Estimation of meltwater runoff from glaciers and snow cover in Nam Co Basin, Tibetan Plateau[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2016, 14(2): 127-136.]

[52] 周峰, 覃姗, 岳春芳, 等. 基于SRM模型的金沟河流域融雪径流模拟[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2020, 18(5): 395-400. [Zhou Feng, Qin Shan, Yue Chunfang, et al. Simulation of snowmelt runoff in Jingou River Basin based on SRM model[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2020, 18(5): 395-400.]

[53] 李霖. HBV水文预报模型及与之集成的水文模型系统介绍[J]. 水利水文自动化, 2004(2): 39-42. [Li Lin. HBV hydrological forecast model and its integrative system[J]. Automation in Water Conservancy and Hydrology, 2004(2): 39-42.]

[54] 陈心池, 张利平, 陈少丹, 等. SRM融雪径流模型在奎屯河流域洪水预报的应用[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(1): 50-56. [Chen Xinchi, Zhang Liping, Chen Shaodan, et al. Snowmelt runoff model applied in Kuitun River catchment for flood forecasting [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(1): 50-56.]

[55] Richard B, Marcel P, Jean S, et al. Application of a snow cover energy and mass balance model in a balsam fir forest[J]. Water Resources Research, 1990, 26(5): 1079-1092.

[56] Mcmichael C E, Hope A S, Loaiciga H A. Distributed hydrological modelling in California semi-arid shrublands: MIKE SHE model calibration and uncertainty estimation[J]. Journal of Hydrology, 2006, 317(3): 307-324.

[57] 王中根, 刘昌明, 黄友波. SWAT模型的原理、结构及应用研究[J]. 地理科学进展, 2003, 22(1): 79-86. [Wang Zhonggen, Liu Changming, Huang Youbo. The theory of SWAT model and its application in Heihe Basin[J]. Progress in Geography, 2003, 22(1): 79-86.]

[58] Dang S Z, Liu C M. Modification of SNTHERM albedo algorithm and response from black carbon in snow[J]. Advanced Materials Research, 2011, 281: 147-150.

[59] Bartelt P, Lehning M. A physical SNOWPACK model for the Swiss avalanche warning: Part I: Numerical model[J]. Cold Regions Science and Technology, 2002, 35(3): 123-145.

[60] Vafakhah M, Sedighi F, Javadi M R. Modeling the rainfall-runoff data in snow-affected watershed[J]. International Journal of Computer and Electrical Engineering, 2014, 6(1): 40-43.

[61] Thapa S. Snowmelt-driven streamflow prediction using machine learning techniques (LSTM, NARX, GPR, and SVR) [J]. Water, 2020, 12(6): 1734, doi: 10.3390/w12061734.

[62] Sharma V, Yuden K. Imputing missing data in hydrology using machine learning models[J]. International Journal of Engineering and Technical Research, 2021, 10(1): 78-82.

[63] Hou J, Huang C, Zhang Y, et al. Gap-filling of MODIS fractional snow cover products via non-local spatio-temporal filtering based on machine learning techniques[J]. Remote Sensing, 2019, 11(1):

90, doi: 10.3390/rs11010090.

[64] Musselman K N, Flavio L, Kyoko I, et al. Projected increases and shifts in rain-on-snow flood risk over western North America[J]. Nature Climate Change, 2018, 8: 808-816.

[65] Demeritt D, Nobert S, Cloke H L, et al. The European flood alert system and the communication, perception, and use of ensemble predictions for operational flood risk management[J]. Hydrological Processes, 2013, 27(1): 147-157.

[66] Mori N, Hirakuchi H. Skill and relative econmic value of ensemble ocean wave prediction[J]. Doboku Gakkai Ronbunshu, 2010 (768): 167-177.

[67] Gelfan A, Moreydo V, Motovilov Y, et al. Long-term ensemble forecast of snowmelt inflow into the Cheboksary Reservoir under two different weather scenarios[J]. Hydrology and Earth System Sciences Discussions, 2018, 22(4): 1-28.

[68] Azam M, San H, Seung K, et al. Development of flood alert application in Mushim Stream Watershed Korea[J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2017, 21: 11-26.

[69] 刘志辉. 流域供水管理决策支持系统总体设计[J]. 干旱区地理, 2000, 23(3): 259-263. [Liu Zhihui. Desicion support system for water supply management in drainage basin[J]. Arid Land Geography, 2000, 23(3): 259-263.]

[70] 马俊英, 刘志辉. 新疆干旱区流域防洪决策支持系统规划设计[J]. 新疆大学学报(自然科学版), 2002(3): 354-357. [Ma Junying, Liu Zhihui. The plan of controlling flood decision support system in Xinjiang arid area[J]. Journal of Xinjiang University (Natural Science Edition), 2002(3): 354-357.]

[71] 闫彦, 刘志辉, 叶朝霞. 新疆北疆地区融雪洪水灾害预警模型的建立与验证[J]. 干旱区地理, 2009, 32(4): 554-557. [Yan Yan, Liu Zhihui, Ye Zhaoxia. Establishment and verification of early-warning model snowmelt flood in northern Xinjiang[J]. Arid Land Geography, 2009, 32(4): 554-557.]

[72] Fang S F, Xu L D, Zhu Y Q, et al. An integrated information system for snowmelt flood early-warning based on internet of things [J]. Information Systems Frontiers, 2015, 17(2): 321-335.

[73] Liu D, Zhong S B, Huang Q Y. Study on risk assessment framework for snowmelt flood and hydro-network extraction from watersheds[C]//Bian F L, Xie Y C. Geo-Informatics In Resource Management and Sustainable Ecosystem: Third International Conference, GRMSE 2015. Berlin Heidelberg: Springer, 2016.

[74] 王大环, 刘洋, 刘志辉, 等. 基于熵权的模糊聚类模型在山区融雪洪水产流类型中的分类应用[J]. 中国农村水利水电, 2017 (5): 114-117. [Wang Dahuan, Liu Yang, Liu Zhihui, et al. Flood-type classification in mountainous catchments using fuzzy C-means algorithm classification based on entropy weight[J]. China Rural Water and Hydropower, 2017(5): 114-117, 123.]

[75] 陈伏龙, 张婷, 冯平, 等. 融雪洪水跳跃变异对其参数估计不确定性影响分析[J]. 冰川冻土, 2018, 40(5): 1004-1015. [Chen Fulong, Zhang Ting, Feng Ping, et al. Impact of jump up components on the uncertainties of parameters estimation in snowmelt flood sequences[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2018, 40(5): 1004-1015.]

[76] Zhou J, Pomeroy J W, Zhang W, et al. Simulating cold regions hydrological processes using a modular model in the west of China [J]. Journal of Hydrology, 2014, 509: 13-24.

[77] Pomeroy J W, Gray D M, Landine P G. The prairie blowing snow model: Characteristics, validation, operation[J]. Journal of Hydrology, 1993, 144(1-4): 165-192.

[78] Lehning M, Voelksch I, Gustafsson D, et al. ALPINE3D: A detailed model of mountain surface processes and its application to snow hydrology[J]. Hydrological Processes, 2006, 20(10): 2111-2128.

[79] Luo L, Robock A, Vinnikov K Y, et al. Effects of frozen soil on soil temperature, spring infiltration, and runoff: Results from the PILPS 2(d) experiment at Valdai, Russia[J]. Journal of Hydrometeorology, 2003, 4(2): 334-351.

[80] Yamazaki Y, Kubota J, Ohata T, et al. Seasonal changes in runoff characteristics on a permafrost watershed in the southern mountainous region of eastern Siberia[J]. Hydrological Processes, 2010, 20(3): 453-467.

[81] Li D, Lettenmaier D P, Margulis S A, et al. The role of rain-on-snow in flooding over the conterminous United States[J]. Water Resources Research, 2019, 55(11): 8492-8513.

Application of snowmelt runoff model in flood forecasting and warning in Xinjiang

YU Qiying[1,2], HU Caihong[1], BAI Yungang[2], LU Zhenlin[2],
CAO Biao[2], LIU Fuyu[2], LIU Chengshuai[1]
(1. Yellow River Laboratory, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, Henan, China;
2. Xinjiang Institute of Water Resources and Hydropower Research, Urumqi 830049, Xinjiang, China)

Abstract: This study examines various flood disaster types in Xinjiang, China, encompassing extreme temperature fluctuations, snowstorms, and warm, humid conditions attributed to global climate change. This study focuses on the underexplored issue of snowmelt floods, addressing their escalating frequency, severity, and associated disaster risk in Xinjiang. Using VOSviewer software, this study analyzes the research keywords and collaboration networks among different authors investigating snowmelt floods in Xinjiang. In addition, it scrutinizes the research priorities of scholars at various stages. A comparative analysis of the characteristics and research status of diverse snowmelt runoff models is presented. The study advocates for future research in Xinjiang to delve into the physical mechanisms and snowmelt processes integral to snowmelt runoff models, aiming to enhance prediction and warning accuracy. An assessment of the technologies employed for predicting and warning snowmelt floods in Xinjiang is conducted, highlighting pertinent issues such as wind-blown snow, frozen ground surface snow, and rain-on-snow. Furthermore, the study recommends key technologies to augment the overall capability of flood simulation, prediction, warning, and response to abrupt floods. It also explores strategies for optimizing the use of flood resources. In conclusion, this study furnishes recommendations for refining the prediction and warning technology pertinent to snowmelt floods in Xinjiang.
Key words: snowmelt flood; snowmelt model; flood forecast; Xinjiang